

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический (ЭНИН)

Направление подготовки 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника

Кафедра Электроснабжение промышленных предприятий (ЭПП)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка технологии получения прозрачной керамики на основе оксида алюминия для термоядерной энергетики

УДК 621.039.6.666.3

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM5K	Кривцун Юрий Павлович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ивашутенко Александр Сергеевич	к.т.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Попова Светлана Николаевна	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Амелькович Юлия Александровна	к.т.н., доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

И.о. зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Электроснабжение промышленных предприятий	Сурков М.А.	д.т.н., доцент		

Томск – 2017 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический (ЭНИН)

Направление подготовки 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника

Кафедра Электроснабжение промышленных предприятий (ЭПП)

УТВЕРЖДАЮ:

И.о. зав. кафедрой ЭПП

(Подпись) _____ (Дата) Сурков М.А.
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
5AM5K	Кривцун Юрий Павлович

Тема работы:

Разработка технологии получения прозрачной керамики на основе оксида алюминия для термоядерной энергетики.	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	13.02.2017 г. № 719/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе (наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</p>	<p>Алюминий марок: Д-16 и АД-31; Газ: технический кислород и аргон; Плазмодинамический синтез получения ультрадисперсных материалов; Технология искрового плазменного спекания</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов (аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</p>	<p>1. Обзор литературы; 2. Методики проведения плазмодинамического синтеза; 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение; 4. Финансовый менеджмент; 5. Социальная ответственность.</p>
<p>Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)</p>	<p>-</p>
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов)</p>	

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Попова Светлана Николаевна
Социальная ответственность	Амелькович Юлия Александровна
Раздел магистерской диссертации, выполненный на иностранном языке	Соколова Эльвира Яковлевна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Introduction	
Methods for carrying out plasmadynamic synthesis and spark plasma sintering	
Conclusion	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ивашутенко Александр Сергеевич	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM5K	Кривцун Юрий Павлович		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Профессиональные компетенции	
ПК-1	Формулировать технические задания, разрабатывать и использовать средства автоматизации при проектировании и технологической подготовке производства
ПК-2	Применять методы анализа вариантов, разработки и поиска компромиссных решений
ПК-3	Применять методы создания и анализа моделей, позволяющих прогнозировать свойства и поведение объектов профессиональной деятельности
ПК-4	Составлять инструкции по эксплуатации оборудования и программ испытаний
ПК-5	Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.
ПК-6	Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности.
ПК-7	Выполнять инженерные проекты с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.
ПК-8	Проводить инновационные инженерные исследования в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
ПК-9	Проводить технико-экономическое обоснование проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.
ПК-10	Проводить монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы электроэнергетического и электротехнического оборудования.
ПК-11	Осваивать новое электроэнергетическое и электротехническое

	оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.
ПК-12	Разрабатывать рабочую проектную и научно-техническую документацию в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять оперативную документацию, предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы.
Универсальные компетенции	
ОПК-1	формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать и создавать критерии оценки
ОПК-2	Применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы
ОПК-3	Использовать иностранный язык в профессиональной сфере
ОПК-4	Совершенствовать и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться нравственного и физического совершенствования своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.
ОПК-5	Использовать на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.
ОПК-6	Использовать представление о методологических основах научного познания и творчества, роли научной информации в развитии науки, готовностью вести работу с привлечением современных информационных технологий, синтезировать и критически резюмировать информацию.

Оглавление

Реферат	8
Введение	9
1. Обзор литературы	11
1.1. Методы синтеза ультрадисперсных порошков на основе оксида алюминия Al_2O_3	11
1.1.1. Метод распылительной сушки	12
1.1.2. Электрический взрыв проводников	14
1.1.3. Золь-гель метод	17
1.1.4. Электрохимический синтез	20
1.1.5. Метод плазмохимического синтеза	23
1.2. Методы компактирования порошков оксида алюминия	25
1.2.1. Горячее прессование	26
1.2.2. Горячее изостатическое прессование	28
1.2.3. Искровое плазменное спекание	31
2. Методики проведения плазмодинамического синтеза и искрового плазменного спекания	34
2.1. Методика проведения плазмодинамического синтеза ультрадисперсных материалов системы Al-O	34
2.2. Устройство и принцип действия коаксиального магнитоплазменного ускорителя	36
2.3. Консолидация порошков оксида алюминия методом искрового плазменного спекания	41
3. Экспериментальные результаты и их обсуждение	46
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	61
4.1. Оценка инновационного потенциала НТИ	61
4.2. Оценка потенциала научного исследования	62
4.3. Планирование и организация научно-исследовательских работ	63
4.3.1. Структура работ научного исследования	64
4.3.2. Определение трудоемкости выполнения работ и построение графика Ганта	65

4.4. Смета затрат на осуществление проекта.....	70
4.5. Оценка ресурсоэффективности НТИ.....	72
5. Социальная ответственность	74
5.1. Производственная безопасность.....	75
5.2. Экологическая безопасность	85
5.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	86
5.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности...	89
Заключение.....	92
Список используемых источников.....	93

Реферат

Выпускная квалификационная работа 90 с., 43 рис., 15 табл., 65 источников.

Ключевые слова: прозрачная керамика, ультрадисперсная частица, нанопорошок, коаксиальный магнитоплазменный ускоритель, плазмодинамический синтез, искровое плазменное спекание.

Key words: transparent ceramics, nano powder, ultrafine particle, coaxial magnetoplasma accelerator, plasmodynamic synthesis, spark plasma sintering.

Объектом исследования является прозрачная керамика

Цель работы – получение прозрачной керамики на основе оксида алюминия для ядерной энергетики.

The objective: obtaining transparent ceramics based on aluminum oxide for nuclear power engineering.

Методология проведения работы: в процессе выполнения магистерской диссертации были подробно изучены методы получения ультрадисперсных порошков на основе оксида алюминия Al_2O_3 и методы консолидации порошков для получения прозрачной керамики. Произведен синтез ультрадисперсного порошка методом плазмодинамического синтеза и произведено его прессование методом искрового плазменного спекания. В работе была получена прозрачная керамика обладающая уникальными свойствами.

Результаты работы: была получена прозрачная керамика на основе оксида алюминия Al_2O_3 , а также проведен анализ ее свойств.

Область применения: могут применяться в оптических элементах диагностических систем термоядерного реактора.

Введение

Актуальность работы. Оксид алюминия $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, как материал, называется корунд. Как функциональный материал обладает целым рядом уникальных свойств: средней плотностью $\sim 3,96 \text{ г/см}^3$, высокой термостойкостью с температурой плавления 2044°C и с температурой кипения 3530°C , диэлектрической проницаемостью $\sim 9,5$, электрической плотностью 10 кВ/мм , высокой твердостью - по твердости близок к алмазу, и является полупроводником n-типа. Практически нерастворим в кислотах. Растворяется в горячих растворах и расплавах щелочей. А также оксид алюминия позволяет получать готовый продукт, который обладает высокой прозрачностью, что позволяет использование его для термоядерной энергетики, свойства которого в совокупности, являются одним целым.

Основные модификации оксида алюминия.

В природе можно встретить только тригональную α -модификацию оксида алюминия в виде минерала корунда и его редких драгоценных разновидностей (рубин, сапфир и т. д.). Она является единственной термодинамически стабильной формой Al_2O_3 . При термообработке гидроксидов алюминия около 400°C получают кубическую γ -форму. При $1100\text{—}1200^\circ\text{C}$ с γ -модификацией происходит необратимое превращение в $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, но скорость этого процесса мала, и для завершения фазового перехода необходимо повышение температуры обработки до $1400\text{—}1450^\circ\text{C}$, либо наличие минерализаторов.

Оксид алюминия является, одним из самых распространённых материалов используемым для производства технической керамики. Изделия из технической керамики используются во всех сферах жизнедеятельности человека — дома, на дороге, в офисах, медицинских учреждениях, и, особенно, в промышленности. Изделия на основе оксида алюминия обладают высокой твёрдостью, огнеупорностью и антифрикционными свойствами, а также является хорошим изолятором. Они используются в горелках

газоразрядных ламп, в зубных протезах, подложек интегральных схем, в запорных элементах керамических трубопроводных кранов и т. д.

Цель диссертационной работы:

Основной целью диссертационной работы является получение прозрачной керамики на основе оксида алюминия для ядерной энергетики. Изучение механических, электрофизических, структурных свойств полученных образцов (компактов) с помощью искрового плазменного спекания.

Для выполнения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Плазмодинамический синтез ультрадисперсных порошков на основе оксида алюминия.
2. Искровое плазменное спекание порошковых материалов на основе оксида алюминия
3. Изучение структуры, физико-механических и оптических свойств керамики на основе оксида алюминия

1. Обзор литературы

Получение прозрачных материалов на основе оксида алюминия в последние годы сильно развивается и имеет свои «недочеты» тяжело получать материал с пористостью 0% и светопропусканием 100 %. Поэтому в данной главе рассмотрим методы синтеза ультрадисперсных порошков и методы их спекания для получения прозрачной керамики.

1.1. Методы синтеза ультрадисперсных порошков на основе оксида алюминия Al_2O_3 .

Методы получения ультрадисперсных порошков можно разделить на химические и физические [2]. К физическим методам относятся распыление, механическое измельчение, конденсация из паровой фазы в вакууме или при пониженном давлении инертного газа (метод испарения в газовой фазе). В основе физических методов получения ультрадисперсных материалов лежит принцип испарения исходного вещества и конденсации конечного продукта. Основное отличие методов заключается в способе нагрева исходного материала: высокочастотным излучением, электрическим током, плазмой, ударной волной, горением и др. К химическим методам можно отнести электрическое диспергирование и образование коллоидов при электрическом разряде в жидкости, методы восстановления и осаждения. Также на сегодняшний день широко используются комбинированные методы. В основе таких методов лежит физическое испарение сопровождающееся химическими реакциями между материалом и окружающим газом на стадии конденсации и расширения.

Для получения оксида алюминия используется несколько методов синтеза помимо плазмодинамического, который рассмотрим ниже:

1. Метод распылительной сушки;
2. Электрический взрыв проводников;
3. Золь-гель метод;
4. Электрохимический метод;
5. Метод плазмохимического синтеза.

1.1.1. Метод распылительной сушки

Метод распылительной сушки основан на высушивании продукта путем испарения находящегося в нем растворителя. Высушенный материал получается в виде ультрадисперсного порошка. В сушильных аппаратах процесс высушивания завершается очень быстро (около 15 - 30 секунд) за счет высокой интенсивности испарения влаги, т.к. происходит дисперсное распределение материала в рабочей камере, через которую движется нагретый воздух или топочные газы, при этом удельная поверхность испарения становится большой. Процесс сушки начинается с распыления жидкого сырья в сушильную камеру. Подача осуществляется посредством центробежного распылителя или форсунок. При соприкосновении капель с потоком горячего воздуха, они превращаются в порошок. Скорость процесса испарения влаги можно регулировать, изменяя величину потока горячего воздуха. Готовая продукция непрерывно отводится из нижней части установки, при этом порошок имеет высокое качество, высокую чистоту, равномерную однородную структуру и хорошую растворимость. Воздух после процесса сушки отводится из системы вытяжным вентилятором. Принципиальная схема установки продемонстрирована на рисунке 1.

В работе [1] была продемонстрирована возможность применения распылительной сушки для получения порошков оксида алюминия. Установлено, что при распылительной сушке существует возможность получать гранулы оксида алюминия размером от 0,5 до 5 мкм, состоящие из наночастиц размером 100 нм и меньше. Размер частиц на выходе зависит в основном от выбранного распылительного колпачка. В данной работе для получения порошков оксида алюминия была использована установка *Nano Spray Dryer B-90*. Метод нанораспылительной сушки был разработан для получения частиц размером от десятков нанометров до десятков микрометров из суспензий или растворов путем высушивания с выходом до 90%.

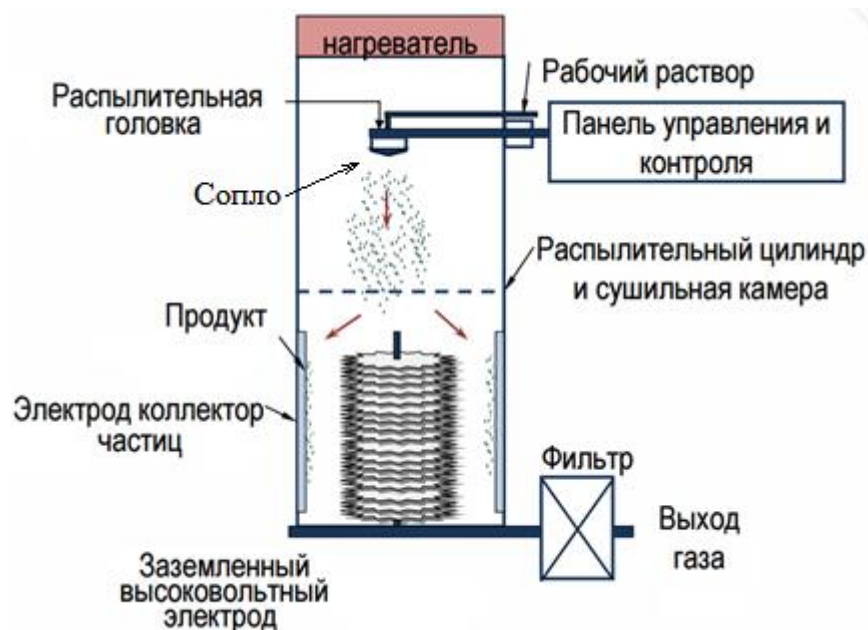


Рисунок 1 – Nano Spray Dryer

Подробно рассмотрим принцип действия получения порошка методом распылительной сушки. В работе использовали 0,5 М водный раствор сульфата алюминия с использованием дистиллированной воды. После приготовления раствор выдерживали при температуре 60°C в течение суток. Осушающий газ проходит через нагреватель и поступает на вертикально закрепленную распылительную головку, как показано на ри.1. По мере движения по распылительному цилиндру капли образца высыхают в потоке нагретого воздуха. Электрическое поле генерируется благодаря высокому напряжению между электродом высокого напряжения и электродом-коллектором. В то время как электрод-коллектор притягивает частицы, высоковольтный электрод сдвигает их в сторону стенок. Поэтому частицы собираются на внутренней стороне электрода-коллектора. В конце опыта частицы снимают со стенки колбы с использованием специальной лопатки. После чего выделенный из раствора порошок сушили в течение суток при комнатной температуре, затем подвергали индивидуальной термообработке: например Al_2O_3 сушили 2 часа при температуре 1200°C и 3 часа при температуре 550°C.

Для определения размера частиц и установления фазового состава порошки исследовали на дифрактометре *XRD – 7000 X – RAY* методом рентгенофазового анализа. Для определения размера частиц использовали прибор *SALD 7101* на основе метода лазерной дифракции. Перед исследованием образцы покрывали слоем платины. В таблице 1 представлен фазовый состав продукта, размер областей когерентного рассеяния (ОКР) частиц оксида алюминия и химический состав продукта.

Таблица 1 – Фазовый состав продукта

Метод выделения порошка	Состав раствора	Размер ОКР	Фазовый состав	Химический состав, мол, %
Распылительная сушка	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 - \text{H}_2\text{O}$	77нм	$\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$	(O) 51,25 (Al) 48,75

Основные преимущества данного метода перед другими – низкая себестоимость продукции и возможность получения порошков заданного состава в промышленных масштабах. Однако, наряду с преимуществами этот метод имеет и существенные недостатки – порошки, получаемые таким способом, имеют высокую степень агрегации и агломерации продуктов осаждения и прокаливания осадков, а также широкий спектр размеров, как первичных частиц, так и агломератов. Использование камерных сушилок с большими габаритными размерами, чтобы высушивать продукт при подаче воздуха от ста до ста пятидесяти градусов. Высокая стоимость распылительного оборудования для высушивания продукта в жидком состоянии. Высокий удельный расход электрической энергии, что обуславливается тем, что без предварительного хорошего нагрева сушильной камеры, снижается качество сушки, и продукт получается испорченным.

1.1.2. Электрический взрыв проводников

Суть метода основывается на том, что тонкие алюминиевые проволочки нагреваются (до испарения) при пропускании через нее короткого импульса тока, большой плотности $10^6\text{-}10^9 \text{ А/см}^2$, что приводит к

испарению материала проводника, имеющему взрывной характер [10]. Охлаждение и конденсация происходит в кислородсодержащей среде, где горячие высокоскоростные частицы алюминия реагируют с внешним кислородом, в результате чего и получается ультрадисперсный оксид алюминия [8].

Ученые из Томского политехнического университета запатентовали изобретение в котором осуществляли электрический взрыв алюминиевого проводника в защитной газовой среде и окислительную обработку образующегося порошка с использованием воды, причем алюминиевый проводник размещают над поверхностью воды на расстоянии не более 120 диаметров проводника [16]. Изобретение относится к порошковой технологии, а именно к получению порошковых оксидных материалов, и может найти применение для изготовления металлокерамики, адсорбентов и носителей катализаторов. Способ получения порошка осуществляется следующим образом: разрядную камеру заполняли газом аргоном и наливали дистиллированную воду комнатной температуры объемом 220 мл. Алюминиевую проволоку диаметром $2,5 \cdot 10^{-4}$ м и длиной $1 \cdot 10^{-1}$ м размещали над поверхностью воды на расстоянии $3 \cdot 10^{-2}$ м и диспергировали мощными импульсами тока. Образующийся в результате порошок алюминия попадал в воду, где происходила реакция окисления алюминия (без стадии нагревания) с образованием высокодисперсного порошка оксида алюминия и газообразного водорода. Общая масса взорванного алюминиевого проводника составляла $4 \cdot 10^{-4}$ кг. Образующийся оксид алюминия отделяли от дисперсионной среды и от крупных частиц центрифугированием и последующей декантацией. Полученный порошок оксида алюминия сушили при комнатной температуре.

Данный метод позволяет получать порошки оксидов размеры порошков часто являются супрамикронными с присутствием субмикронной фракции, которую сложно отнести к наноразмерной (более 100 нм). Тем не менее, данный метод можно назвать промышленным для получения частиц

размерами 10-100 нм. Производительность метода оценивается в 50-200 г/ч. В многочисленных литературных источниках отмечается высокая активность таких порошков, обусловленная наличием различных структурных дефектов и существованием метастабильных фаз в частицах.

В научно-исследовательском институте высоких напряжений в 70-х гг. были начаты работы по получению ультрадисперсных порошков под руководством Г.В. Иванова с помощью электрического взрыва проводников в газовых средах [17]. В настоящее время разработана установка для получения ультрадисперсных порошков методом электрического взрыва проводников, представленная на рисунке 2. Технические характеристики установки представлены в таблице 2.



Рисунок 2 – Электровзрывная установка УДП-2М

Таблица 2 – Технические характеристики установки УДП-2М

Технические характеристики	данные
Рабочее напряжение	380 В, 50 Гц, 3 фазы
Зарядное напряжение генератора установки регулируется, кВ	от 20 ± 1 до 35 ± 3
Потребляемая мощность установки, кВт/ч	не более 3
Производительность установки по нанопорошку алюминия, г/час	не менее 70
Производительность установки по нанопорошку алюминия, г/час	не менее 100
Непрерывное время работы макета установки	7 ± 1 часов
Средний размер наночастиц, нм	не более 100

Преимущества установки: высокий КПД передачи энергии, достигающий 90 %, сравнительно небольшой относительно других физических методов разброс частиц по размерам, позволяет существенно экономить энергию в процессе работы, позволяет полностью избегать вредных выбросов.

Существенным недостатком метода является получение нанопорошков только из хорошо проводящих материалов. Кроме того, не все металлы обладают достаточной механической прочностью для изготовления из них тонких проволок, что является необходимым требованием для организации непрерывного технологического процесса на подавляющем большинстве установок современной конструкции.

1.1.3. Золь-гель метод

Один из наиболее известных методов синтеза ультрадисперсного оксида алюминия является золь-гель метод. Суть метода заключается в получении золя с последующим переводом его в гель, которая происходит на одной из стадий процесса синтеза материала. Основными стадиями получения раствора являются: приготовление раствора прекурсора, перевод его в золь, далее в гель (с помощью конденсации и гидролиза), старение, высушивание и термообработка. Стадия высушивания заключается в удалении растворителя из геля, что играет важную роль в золь-гель процессе.

В работе [3] с помощью золь-гель метода синтезировали α - Al_2O_3 . Суть метода состоит в том, что к водному золю NH_4OH и $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ при температуре 80°C добавляли раствор азотной кислоты для достижения коллоидного золя у которого $\text{pH} = 4$. После чего к золю добавляли сажу с удельной поверхностью $106 \text{ м}^2/\text{г}$ с весовым соотношением 20 г (C) и 100 г (Al). Полученную смесь нагревали при 100°C с получением геля. Затем гель сушили в печи при 120°C , далее проводили прокаливание в микроволновой печи мощностью 900 Вт в течение 10 мин. Для удаления остаточного углерода порошок дополнительно прокаливали при 650°C в муфельной печи. С помощью рентгеновской дифракции и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на рисунке 3 были представлены рентгенограмма фаз и микрофотография α - Al_2O_3 .

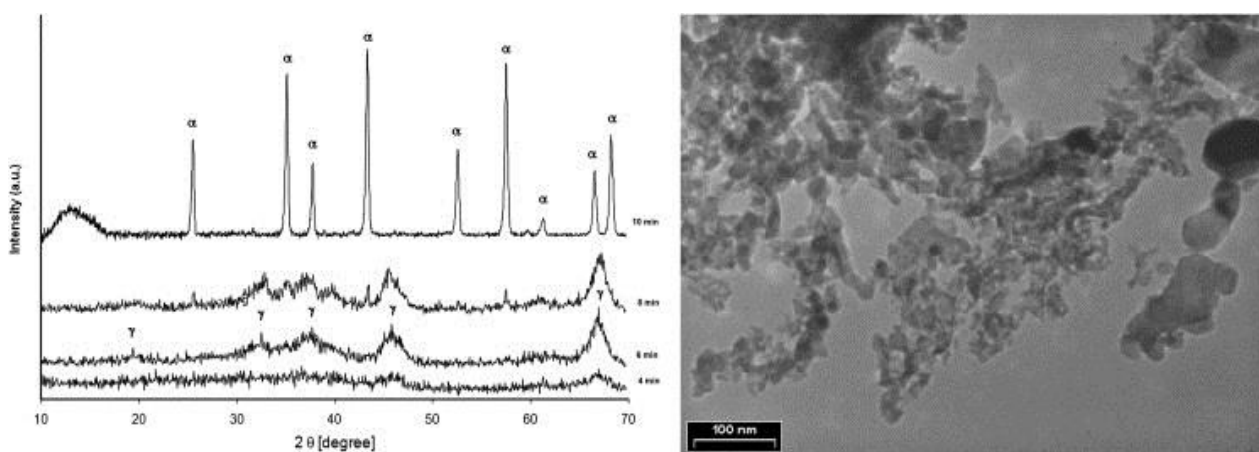


Рисунок 3 – Рентгеновская дифракции порошка α - Al_2O_3 (слева) и микрофотография ПЭМ α - Al_2O_3 , полученного после 10 мин. спекания (справа).

Исследователями были определены размеры кристаллитов нанопорошка α - Al_2O_3 , которые находились в интервале 25-100 нм, а удельная поверхность порошка Al_2O_3 составила $51 \text{ м}^2/\text{г}$.

В статье [4] были получены сферические частицы α - Al_2O_3 золь-гель методом с использованием вторичного (2-этилгексил) сульфосукцината натрия и поверхностно активного вещества додецилбензолсульфоната натрия в качестве стабилизаторов золь. Растворы нагревали до 60°C и перемешивали непрерывно в течение процесса испарения. Вязкость и цвет

изменился, как золь превратился в прозрачный вязкий гель. Затем гели подвергают тепловой обработке при температуре 90 °С в течение 8 ч. Высушенные гели прокаливали при температуре в интервале от 1000 до 1200 °С. Наконец, прокаленные порошки измельчали. Фазовые идентификации были выполнены с помощью рентгеновской дифракции с использованием никеля фильтруют CuK α излучения в диапазоне от $2\theta = 10-80^\circ$ со скоростью сканирования 5 °/мин. Ультразвуковая ванна была использована для приостановки прокаленных порошков в этаноле, а затем несколько капель его было использовано для оценки микроstructures на ПЭМ Fillips CM12 и сканирующей электронной микроскопии Leica Cambridge S-360 и Cambridge Stereoscan 200. Этапы процесса синтеза показаны на рисунке 4.

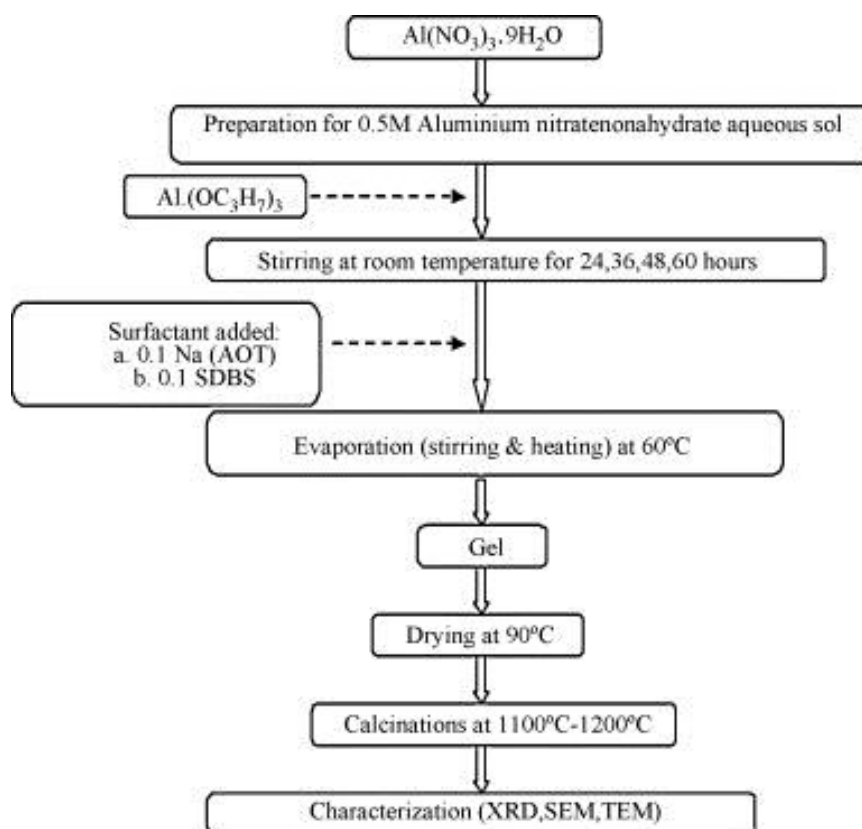


Рисунок 4 – Этапы процесса золь-гель методом

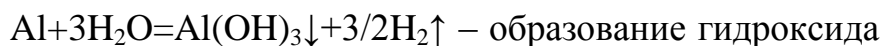
Стабилизаторы золь, предложенные авторами позволяют получать сферические наночастицы размерами 20-30 нм.

Преимущества метода заключаются в высокой химической однородности получаемых продуктов, позволяющая проводить синтез при низких температурах и контролировать размер частиц на разных стадиях процесса. При кажущейся универсальности золь-гель метода технология имеет также недостатки: высокую стоимость сырьевых материалов, большую длительность процесса, нестабильность золя во времени и высокую чувствительность к колебаниям температуры.

1.1.4. Электрохимический синтез

Суть электрохимического синтеза условно состоит из трех этапов: 1) подготовка сырья, материалов 2) электролитическое получение и отделение гидроксида алюминия 3) термическое получение оксида алюминия. Главным этапом электрохимической технологии получения гидроксида алюминия является электролиз. Электрохимический способ реализуется с помощью электролизеров, которые принципиально различаются наличием или отсутствием диафрагмы, и ее разновидности – мембраны. А также могут быть отличия в расположении электродов и конфигурации электролизера. Главное условие проведения электрохимического синтеза заключается в выборе материала электрода. В качестве катодов можно использовать практически любые материалы, обладающие достаточной электропроводностью и химической стойкостью: железо, нержавеющую сталь[18].

Основной реакцией электрохимического процесса при проведении электролиза:



алюминия на аноде и выделение водорода на катоде

Синтез электрохимическим способом – возможность получения очень чистых оксидов, а регулирование электрических параметров процесса электролиза позволяет формировать порошки с заданной дисперсностью.

Принципиальная схема получения оксида алюминия представлена на рисунке 5.

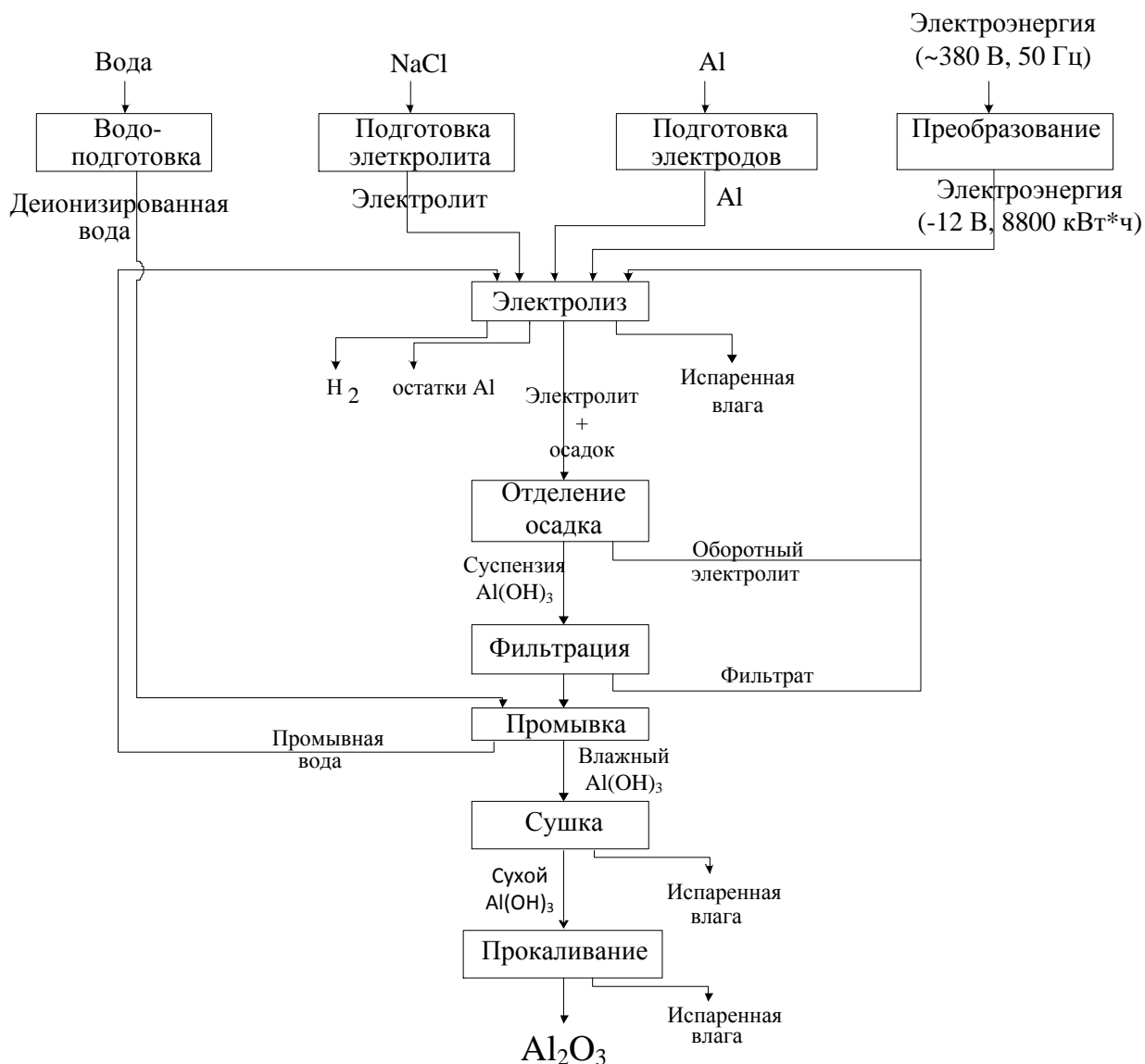


Рисунок 5 – Принципиальная схема технологического цикла получения оксида алюминия методом ЭХМ

Для получения гидроксида алюминия использовали коаксиальный электрохимический реактор, центральным электродом (катодом) служила сталь X18H10T, а анодом – алюминий марки А5. В качестве электролита использовали водный раствор хлорида натрия [5]. В результате проведенных опыт-исследований, показало, что характерное распределение наночастиц оксида алюминия электрохимическим методом по размерам были следующими:

- частицы игольчатой формы шириной ≤ 10 нм, длиной до 100 нм (склонны к агрегированию);
- частицы тонкозернистой структуры (размер зерен ≥ 10 нм);
- агрегаты, образованные частицами размером до 60 нм (форма близка к слабо ограненной, гексагональной).

Проводился анализ микроснимков и было выявлено, что размеры частиц полученных гидроксидов зависят от режимов получения [6]. Можно отметить, что при синтезе гидроксидов алюминия увеличение плотности тока и концентрации раствора электролита приводит к росту микроагрегатов, образованных наночастицами. Режимы экспериментов получения были следующими: №1 ($j=166,7$ А/м², $C_{\text{NaCl}}=0,1$ моль/л), №2 ($j=166,7$ А/м², $C_{\text{NaCl}}=0,5$ моль/л) №3 ($j=83,3$ А/м², $C_{\text{NaCl}}=0,1$ моль/л) №4 ($j=83,3$ А/м², $C_{\text{NaCl}}=0,5$ моль/л)

Анализ оксидов алюминия, полученных путем прокаливания соответствующих гидроксидов, выявил аналогичные закономерности [6]. Оксид алюминия, полученный из образца №1, состоит из мелких частиц расположенных хаотично, размеры которых лежат в пределах 50 нм, форма близка к гексагональной, слабо ограненной. Образец оксида алюминия №2, состоит из более крупных, непрозрачных индивидов (до 500 нм) и существенно более крупных темных агрегатов (до 5-10 мкм). Образец №3 состоит из темных образований неопределенных форм – от вытянутых (~1,5-5 мкм) до изометричных с расплывчатыми контурами (~0,5 мкм). И наконец на фоне беспорядочно сгруппированных мелких (~50 нм) частиц наблюдается темные ограненные частицы размером ≥ 300 нм, полученные из образца №4.

Осадок выдерживали в маточном растворе в течение 48 часов для его кристаллизации, после чего высушивали и фильтровали при температуре 363-383 К. Для получения оксидов, прокаливали гидроксид при температуре 823 К.

В процессе работы с литературой были выявлены достоинства и недостатки метода ЭХМ. К достоинствам можно отнести: высокая чистота конечного продукта и может быть обеспечена крупная масштабность производства. Недостатки: высокий расход электроэнергии, дороговизна оборудования для получения оксида алюминия электрохимическим методом, трудоемкость производства, конечный продукт зависит от каждого цикла процесса приготовления.

1.1.5. Метод плазмохимического синтеза

Метод плазмохимического синтеза является распространённым методом в получении ультрадисперсных порошков оксида алюминия. Метод заключается в протекании реакции в низкотемпературной плазме.

При взаимодействии плазмы с обрабатываемым веществом обеспечивается плавление, диспергирование, испарение, а затем восстановление и синтез продукта с размером частиц до нанометров, включая параметры так называемого критического зародыша. Восстановление и синтез в химической плазме является универсальным способ получения ультрадисперсных порошков металлов, сплавов и их соединений [19].

Характеристики получаемых ультрадисперсных порошков зависят от технологии синтеза, чистоты используемого сырья и типа реактора. Благодаря увеличению скорости охлаждения потока плазмы, в котором происходит процесс конденсации из газовой фазы становится возможным получение ультрадисперсных частиц методом плазмохимического синтеза в реальных условиях. При синтезе частиц этот процесс позволяет достигать желаемой дисперсности. Т.к. плазма имеет в своём составе ионы и электроны, нейтральные частицы, и радикалы, которые находятся в возбужденном состоянии, становится возможным достигать высоких скоростей взаимодействия. При условии, что процесс синтеза происходит при высоких температурах, имеется возможность изменять агрегатное

состояние практически всех исходных продуктов до газообразной фазы с последующей их обработкой [15].

Основными условиями получения порошков данным методом являются [7]:

- Высокая скорость образования зародышей новой фазы при малой скорости их роста, протекание реакции вдали от равновесия;
- Использование низкотемпературной (4000-10000K) азотной, аммиачной, углеродной, водородной, аргоновой плазмы тлеющего, дугового, высоко- или сверхвысокочастотного разрядов;

Плазмохимический синтез включает в себя два основных этапа: образование активных частиц в высокочастотных, дуговых и сверхвысокочастотных плазменных реакторах и выделение продуктов взаимодействия. Частицы таких порошков представляют собой монокристаллы размерами от 10 до 100-200 нм и более. Синтезируемые наночастицы имеют большую избыточную энергию, поэтому их фазовый и химический состав может не соответствовать фазовой диаграмме. Кратковременный дополнительный отжиг продукта в контролируемой среде позволяет получить наночастицы требуемой стехиометрии. Процесс плазмохимического синтеза в электродуговом разряде происходит в результате окисления частиц в кислородсодержащей плазме. Для получения частиц порошков оксида алюминия размером 10-30 нм необходимо создать резкое снижение температуры при взаимодействии паров металлов с кислородом воздуха. Быстрое охлаждение позволяет повысить скорость образования частиц конденсированной фазы, а также затормозить рост частиц [20].

Достоинства плазмохимического синтеза можно отметить такие как, возможность переработки тугоплавкого сырья; малая инерционность; непрерывность процесса.

Недостатки данного метода: широкое распределение частиц по размерам. Наличие довольно крупных (до 1 - 5 мкм) частиц (низкая селективность процесса) и высокое содержание примесей в порошке.

Следовательно, методы синтеза ультрадисперсных порошков оксида алюминия обладают определенными недостатками, такими как: сложность проведения самого процесса синтеза, опасность для здоровья проведения синтеза, подготовки исходных прекурсоров, большая длительность синтеза наночастиц, энергозатратность, наличие загрязняющих примесей и необходимость очистки продукта кислотами и щелочами, малая производительность метода и чистота продукта.

В данной работе предложен новый метод плазмодинамического синтеза ультрадисперсного оксида алюминия в гиперсверхзвуковой ($\sim 2,0$ км/с) сверхточной ($\sim 10^5$ А) импульсной (~ 400 мкс) струе электроразрядной плазмы, генерируемой коаксиальным магнитоплазменным ускорителем с электропитанием от емкостного накопителя энергии. Полное описание плазмодинамического синтеза в работе представлено ниже.

1.2. Методы компактирования порошков оксида алюминия

Получение наноструктурных материалов обладающих желаемых уникальных свойств из нанопорошков является весьма сложной задачей в связи с тем, что в процессе спекания материала происходит рост частиц и размер зерен выходит за пределы 100 нм. Решение этой проблемы является одной из задач современных исследований и целью настоящей работы. В настоящее время существуют различные эффективные методы консолидации нанопорошков, которые позволяют получить материалы с наноразмерной структурой. К таким методам относятся: горячее прессование (hot pressing), горячее изостатическое прессование (hot isostatic pressing), спекание импульсными токами (spark plasma sintering – искровое плазменное спекание) и другие.

Описанные методы имеют преимущества и недостатки для спекания моно и полидисперсных электроизоляционных и электропроводящих нанопорошков. В настоящее время широко применяемый метод SPS (Spark Plasma Sintering) позволяет получить прозрачные, нанозернистые материалы высокой плотности из тугоплавких соединений. Техника SPS имеет значительное преимущество по сравнению с ГИП и ГП, потому что он может завершить консолидацию порошка в течение короткого промежутка времени [1-9]. Ниже рассмотрим подробнее методы прессования

1.2.1. Горячее прессование

Горячее прессование – это процесс одновременно спекания и прессования порошков при температуре от 0,5 до 0,8 от температуры плавления ($T_{пл}$) основного компонента шихты.

Спекание при горячем прессовании (ГП) представляет собой процесс порошковой металлургии высокого давления с низкой степенью деформации для формирования порошка, прессуемого, при достаточно высокой температуре, чтобы вызвать процессы спекания и сжатия. Это достигается одновременным применением подвода тепла и давления. Уплотнение при высоком давлении работает через перераспределение частиц и пластическое течение на контактах частиц. С повышением температуры спекаемого порошка уменьшается величина давления, необходимого для уплотнения порошка.

Горячее прессование используется для изготовления хрупких и твердых материалов. В результате, метод горячего прессования стал хорошим методом получения прозрачной керамики. На рисунке 6 показана схема типичного высокотемпературного устройства для спекания при горячем прессовании.

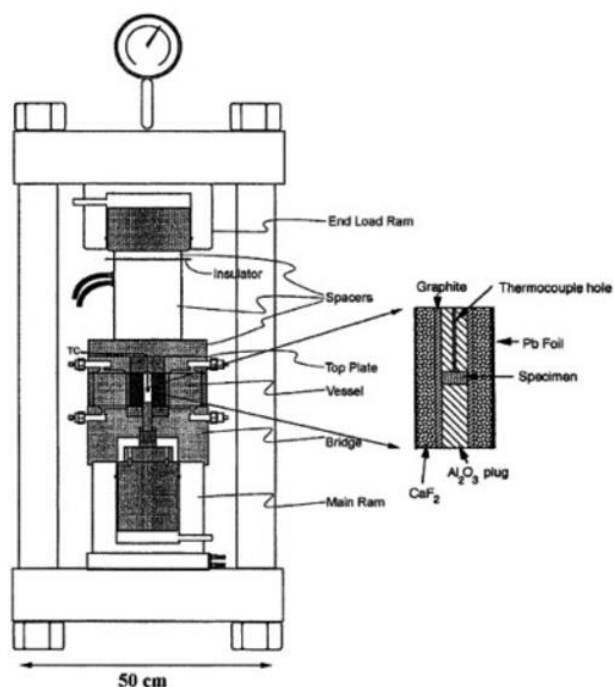


Рисунок 6 – Установка спекания при горячем прессовании

Установка горячего прессования состоит из графитовой печи, обшитой фольгой CaF_2 и Pb. После проведения эксперимента фольга Pb действует как смазка во время выталкивания.

На рисунке 7. Представлены процессы, происходящие при горячем прессовании

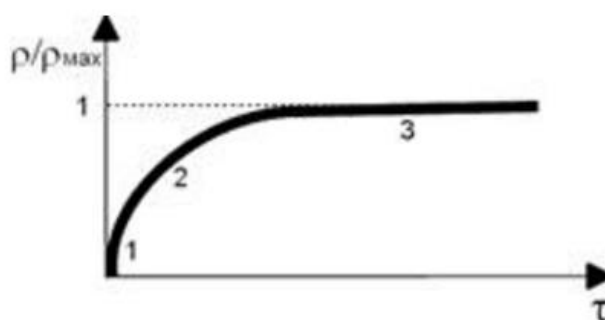


Рисунок 7 – Процессы, происходящие при горячем прессовании

При горячем прессовании совмещаются процессы формования и спекания образцов в пресс-формах, нагреваемых до необходимой температуры. Весь процесс спекания, при горячем прессовании можно разделить на три основные стадии:

На первой стадии идет компоновка порошка путем скольжения частиц и достигает 90 % от максимально достижимой плотности;

На второй стадии идет уплотнение за счет граничного скольжения частиц и объемной деформации и достигает 5-9 % от максимально достижимой плотности;

На третьей стадии происходит только объемная деформация (остаточная), и достигает 1-5 % от максимально достижимой плотности.

Метод горячего прессования имеет достоинства такие как, изделия получают механически прочные.

Недостатки метода: использование жаропрочных дорогостоящих графитовых пресс-форм; быстрый износ пресс-форм; большие прикладываемые давления, невысокая производительность процесса.

1.2.2. Горячее изостатическое прессование

Горячее изостатическое прессование (ГИП) – это обработка под давлением в условиях высоких температур, проходящая в среде инертного газа. А также является производственным процессом, используемым для уменьшения пористости металлов и увеличения плотности различных керамических материалов. Камера нагревается, увеличивая давление внутри сосуда. Во многих системах перекачка попутного газа осуществляется с достижением желаемого уровня давления. Давление прикладывается к материалу со всех сторон [10].

Материалы горячим изостатическим прессованием (ГИП) для достижения максимально возможного уплотнения, что является ключом к достижению высокой светопрозрачности. Чтобы снизить стоимость изготовления, в качестве последнего шага обычно используют горячее изостатическое прессование, хотя доказано, что он является критическим шагом для получения высококачественной прозрачной керамики, поскольку горячее изостатическое прессование является дорогостоящим процессом, требующим критического оборудования и условий эксперимента [11].

Процесс ГИП широко используется для консолидации прозрачной прочной керамики оксида алюминия (Al_2O_3) [11-13]. В этих случаях обычно

применяли вакуумное спекание для удаления закрытой пористости с последующей стадией ГИП, что обеспечивало альтернативный путь обработки для изготовления полностью плотной керамики оксида с меньшей возможностью загрязнения и уменьшения, чем при горячем прессовании [10].

Ученые из Франции Johan Petit, Philippe Dethare и другие представили результаты по спеканию α -оксидных керамик методом горячего изостатического прессования [11]. Он описывает простой метод получения точных значений относительной плотности на почти 100% плотных образцах. Их результаты не близки к наилучшим показателям передачи: почти 60% для образца толщиной 1 мм. Другой 40% рассеянного света происходит от двойного лучепреломления глинозема по большей части. Однако они достаточно прозрачны, чтобы видеть детализированные структуры на несколько километров через них.

В статье [12] был использован порошок коммерческого корунда и способ формования под давлением используются для изготовления сложных полых компонентов и больших плоских окон из спеченного и горячего изостатически прессуемого Al_2O_3 , керамика с размером зерна 0,4-0,6 мкм при относительной плотности более 99,9%. Высокая макротвердость ($HV_{10} = 20-21$ ГПа) и четырехточечное изгибное усилие (600-700 МПа, 750-900 МПа при трехточечном изгибе) связаны с реальной поточной передачей 55-65% через полированные пластины. Микроструктура субмикронметра и оптические свойства могут быть сохранены для использования при температуре более 1100 ° С с использованием присадок, которые сдвигают температуру спекания до высоких значений без дополнительного роста зерна.

Твердость имеет важное значение для высокой баллистической прочности, а при спекании $HV_{10} = 20-22$ ГПа под-мкм Al_2O_3 является самым твердым из всех прозрачных материалов для компактных окон [13]. Однако пропускание света через поликристаллический Al_2O_3 ограничено потерями двулучепреломляющего рассеяния: высокие пропускания известны при

больших длинах волн ИК-диапазона для размеров зерен около 0,5 мкм, но видимая реальная линейная пропускания составляет всего 70-75% от теоретического максимума при 0,8 -1 мм толщины. Эти потери будут выше для более толстых образцов, тогда как для безопасной баллистической характеристики требуется минимум 1,5-2 мм. Новые технологии приближают передачу к пределу, сопоставляя размеры зерен 0,3 мкм с микротвердостью 84-93% от теоретического максимума (толщина 0,8 мм). Поэтому предполагается, что субмикронный Al_2O_3 может быть хорошим выбором для ИК-окон или как броня для приложений с низкой угрозой, где могут использоваться более тонкие образцы.

В [14] была изготовлена полупрозрачная керамика из оксида алюминия с использованием улучшенного метода горячего изостатического прессования. Полупрозрачная керамика из оксида алюминия с чрезвычайно высоким оптическим пропусканием для видимого света и высокой механической прочностью была получена путем применения процесса ГИП к образцу, который был уплотнен при относительно низкой температуре после литья под давлением. Были проведены измерения насыпной плотности и среднего размера зерна, рентгеновской дифракции (XRD) и вторичной ионной масс-спектрометрии. Объемная плотность была выше, чем $3,985 \text{ кг} / \text{м}^3$, средний размер зерна составлял от 0,82 до 1,43 мкм, а постоянная решетки составляла $a = 0,476 \text{ нм}$ и $c = 1,300 \text{ нм}$. Сегрегация примесей на границах зерен и граница раздела зерен не наблюдалась. Коэффициент линейного пропускания увеличивался с уменьшением среднего размера зерна полупрозрачной керамики из оксида алюминия. Было подтверждено, что в просвечивающей глиноземной керамике оптическое рассеяние не происходит из-за увеличения числа границ зерен и пор. Основываясь на этих выводах, было сделано заключение, что улучшение оптического пропускания может быть реализовано путем уменьшения зерен кристалла до менее 1 мкм, а также с помощью обычного способа их выращивания до размера более 20-30 мкм.

1.2.3. Искровое плазменное спекание

Искровое плазменное спекание является наиболее современной технологией спекания под давлением и применяется большинством исследователей с 2000 г. [15,16]. Также метод искрового плазменного спекания, является одним из перспективных методов спекания ультрадисперсных порошков оксида алюминия для получения прозрачной керамики. Схема установки ИПС приведена на рисунке 8.

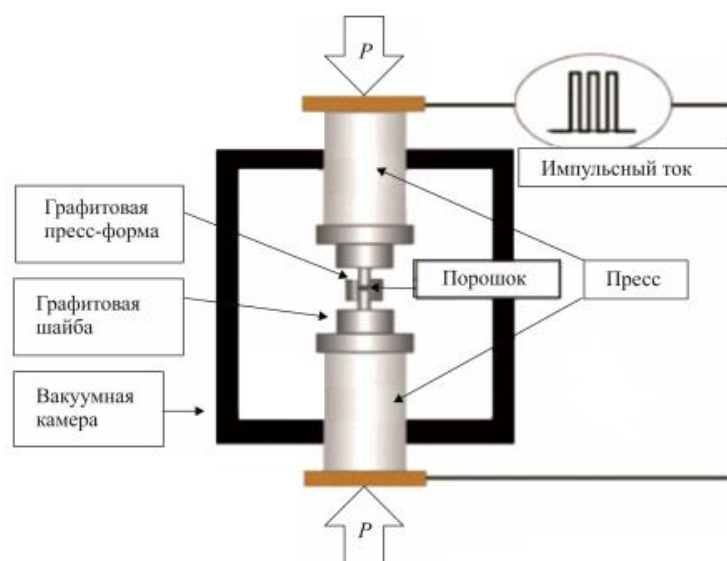


Рисунок 8 – Схема установки искрового плазменного спекания

Принцип его заключается в следующем: протекание процесса происходит в вакуумной или газовой атмосферах, для удаления пор внутри порошка. Далее совместное воздействие импульсного постоянного тока высокой плотности, протекающего через образец и графитовую пресс-форму и воздействия на образец механического давления, при этом материал в зоне воздействия давления и тока разогревается до очень высоких температур, практически до плазменного состояния. Температура контролируется при помощи оптического пирометра, где в графитовой матрице имеется небольшое отверстие к спекаемому материалу для слежения за температурой. Материал нагружается непосредственно перед началом нагрева постоянной нагрузкой. Путь протекания электрического тока через частицы представлен на рисунке 9.

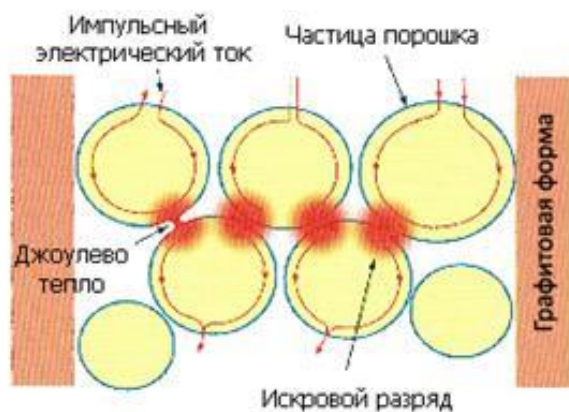


Рисунок 9 – Протекание электрического тока через частицы порошка

Одной из особенностей метода – это возможность консолидации порошка в короткий промежуток времени, что позволяет сохранить размер зерна, значение которого сопоставимо со значением размера исходного порошка, что позволяет получать изделия с уникальным сочетанием свойств.

Процесс уплотнения в искровом плазменном спекании, как правило, разделен на три этапа[22]. Первая стадия характеризуется укладкой частиц, вторая стадия связана с процессом диффузии, сопровождающей скольжение зерна, а также на заключительном этапе является удаление пор главным образом через границу зерна. Приложенное давление сильно влияет на первоначальную упаковку и уплотнение во втором и третьем этапах. Высокое давление постоянно применяется в общем процессе SPS. Скорость нагрева является еще одним важным параметром спекания для уплотнения во втором и третьих этапах.

Метод искрового плазменного спекания (ИПС) может быть использован не только для дисков агломерационного поликристаллического оксида алюминия, но также и для изготовления полусферических куполов [17,18]. Как показали Цзян и соавт. [19], изготовление прозрачных куполов поликристаллического оксида алюминия может быть получено путем объединения спекания и формирования в одну стадию в течение нескольких минут, а так как при использовании обычных методов занимает в десятки раз больше времени, чем искровое плазменное спекание. Данный способ

формирования обеспечивает беспрецедентные возможности сделать прозрачные купола при значительно меньших затратах.

Метод искрового плазменного спекания позволяет получить необходимый материал при более низких температурах в отличие от других методов спекания, что благоприятно сказывается на структуре спеченного материала.

Искровое плазменное спекание применимо к большинству керамических материалов. Этим методом можно получить высокопрозрачную керамику, в том числе из материалов с двойным лучепреломлением. Например, прозрачная керамика Al_2O_3 была спечена при температурах от 1300 до 1400°C при давлении 80 МПа, скорости нагрева 100°C/мин и выдержке 3 мин [20-22].

Преимуществами данного метода являются такие как:

- Равномерное распределение тепла по образцу, что сказывается на равномерном росте зерна при спекании;
- Достижение полной плотности при спекании;
- Размер зерна сопоставим с размером исходного порошка, что является немаловажным условием для получения керамики с высокими оптическими свойствами;
- Малая продолжительность процесса спекания и равномерное спекание однородных и разнородных материалов.

Недостатками данного метода являются: быстрый износ графитовых пресс-форм.

Метод искрового плазменного спекания реализован нами для порошковой композиции Al_2O_3 и MgO , выступающий в качестве основы для получения перспективного керамического прозрачного материала для термоядерной энергетики.

Далее рассмотрим методику плазмодинамического синтеза и методику искрового плазменного спекания.

2. Методики проведения плазмодинамического синтеза и искрового плазменного спекания

2.1. Методика проведения плазмодинамического синтеза ультрадисперсных материалов системы Al-O

Исследования плазмодинамического синтеза ультрадисперсных материалов системы Al-O производились на основе комплексной системы, включающей в себя установку для генерации плазменного потока – импульсный сильноточный коаксиальный магнитоплазменный ускоритель (КМПУ), экспериментальный стенд на основе емкостного накопителя энергии (ЕНЭ), а также вспомогательную и регистрационную аппаратуру.

Методика плазмодинамического синтеза основана на генерации сверхзвукового плазменного потока в ускорительном канале (УК) КМПУ и истечении его в пространство камеры-реактора (КР), где в головном скачке уплотнения плазменной струи обеспечиваются условия для синтеза различных сверхтвердых материалов.

Экспериментальный стенд включает в себя системы и устройства, обеспечивающие безопасное и корректное проведение экспериментов с возможностью управления параметрами процесса и измерения физических величин. В составе экспериментального стенда выделяются следующие системы: емкостной накопитель энергии, система питания, система синхронизации, система регистрации, система защиты. ЕНЭ является импульсным источником электропитания КМПУ. Использование ЕНЭ при проведении экспериментальных исследований обусловлено следующими достоинствами [23]: надежность работы; высокая эффективность передачи накопленной энергии в нагрузку; возможность широкого регулирования характеристик импульса; использование маломощных устройств для зарядки.

ЕНЭ обладает суммарной емкостью $C = 28,8$ мФ при зарядном напряжении $U_{\text{зар}} \leq 5,0$ кВ. Зарядка ЕНЭ осуществляется постоянным током, ограниченным до значения 5 мА блоком зарядных резисторов. Для

получения постоянного высокого зарядного напряжения из напряжения трехфазной сети используются параллельно соединенные однофазные силовые трансформаторы и однофазный мостовой выпрямитель. Регулирование зарядного напряжения осуществляется тиристорным регулятором. Разрядка модулей ЕНЭ осуществляется посредством их коммутации на шины сборного коллектора с помощью индивидуальных игнитронных разрядников. Функцию управления разрядниками осуществляют четыре блока управления (БУИ). Каждый из разрядников запускается посредством поджигающего высоковольтного импульса, сформированного индивидуально для каждого разрядника с помощью импульсного трансформатора. Управляющий импульс на БУИ подается по коаксиальному кабелю от генератора импульсов.

Управление работой лабораторной установки и контроль зарядного тока и напряжения накопителя осуществляется с пульта управления и контроля. Для синхронизации работы всей схемы предназначен генератор задержанных импульсов ГИ-1.

Система регистрации включает в себя совокупность устройств, позволяющих определять величины токов и напряжений в течение проведения эксперимента. Измерение импульсного тока осуществляется с помощью трансформатора Роговского. Преимуществом использования трансформатора Роговского как датчика для измерения импульсного тока являются [24]: высокая линейность и низкая инерционность датчика, что позволяет регистрировать токовые импульсы в широком диапазоне частот; низкая стоимость, малая потребляемая мощность; отсутствие явления насыщения при больших токах; невосприимчивость к смещению по постоянному току. Для измерения быстроизменяющегося напряжения на электродах КМПУ используются омические делители напряжения. Сигналы тока и напряжения регистрируются цифровыми осциллографами Tektronix TDS2012.

2.2. Устройство и принцип действия коаксиального магнитоплазменного ускорителя.

Метод плазмодинамического синтеза в гиперскоростной электроразрядной струе, генерируемой специальным устройством – коаксиальным магнитоплазменным ускорителем (КМПУ). Схема устройства КМПУ представлена на рисунке 10.

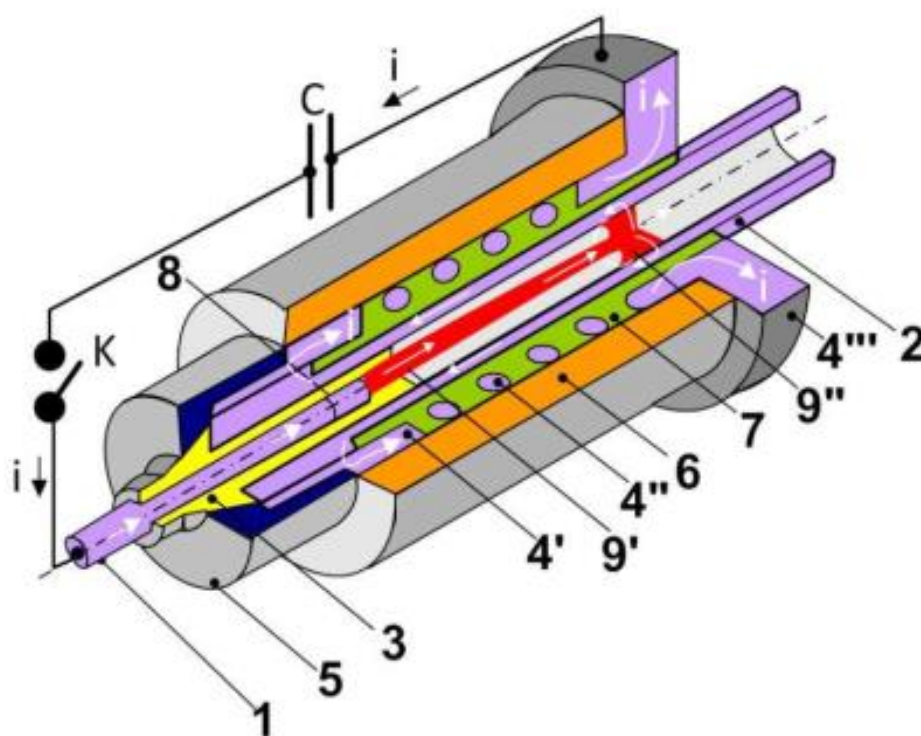


Рисунок 10 – Устройство коаксиального магнитоплазменного ускорителя

Коаксиально магнитоплазменный ускоритель состоит из: 1 – центральный электрод; 2 – электрод-ствол; 3 – изолятор центрального электрода; 4 – индуктор (4' – контактный цилиндр, 4'' – соленоид, 4''' – контактный фланец); 5 – заглушка; 6 – корпус; 7 – изоляция; 8 – графитовый наконечник; 9 – плазменная структура сильноточного разряда (9' – плазменный жгут – z-пинч, 9'' – круговая плазменная перемычка).

Конструкция Z-пинч-ускорителя и ее элементы показаны на рисунке 11. Основными частями КМПУ являются центральный электрод (ЦЭ) 1 и электрод-ствол 3 с УК внутри отрезка трубы из алюминия. Диаметр УК $d_{УК} = 9,5$ мм, длина УК $L_{УК} = 310$ мм. Изоляция ЦЭ 2 выполнена из

стеклопластикового материала. Канал формирования плазменной структуры (КФПС) со стороны УК, предназначенный для размещения твердых прекурсоров в виде порошкообразной смеси аморфного бора и углерода (сажи), выполняющей функцию проводящей перемычки между электродами КМПУ. Графитовый наконечник плотно вставляется в ускорительный канал, охваченный стальной обоймой и герметизируется. В единую конструкцию Z-пинч- ускоритель объединяется с помощью стальной обоймы 4, как показано на рисунке 11 Б. КМПУ в собранном виде показан на рисунке 11 В. Индукционная система ускорителя представляет собой мощный 4-х витковый соленоид, выполненный в виде единой конструкции с контактными цилиндром 7 и фланцем 6 (рисунок 11 В). Электродинамическая устойчивость, механическая прочность и межвитковая изоляция индуктора обеспечиваются стеклопластиковым корпусом 7 (рисунок 11 В) и изоляцией из эпоксидного компаунда. Прочность в осевом направлении обеспечивается стальными шпильками 8 (рисунок 11 В)

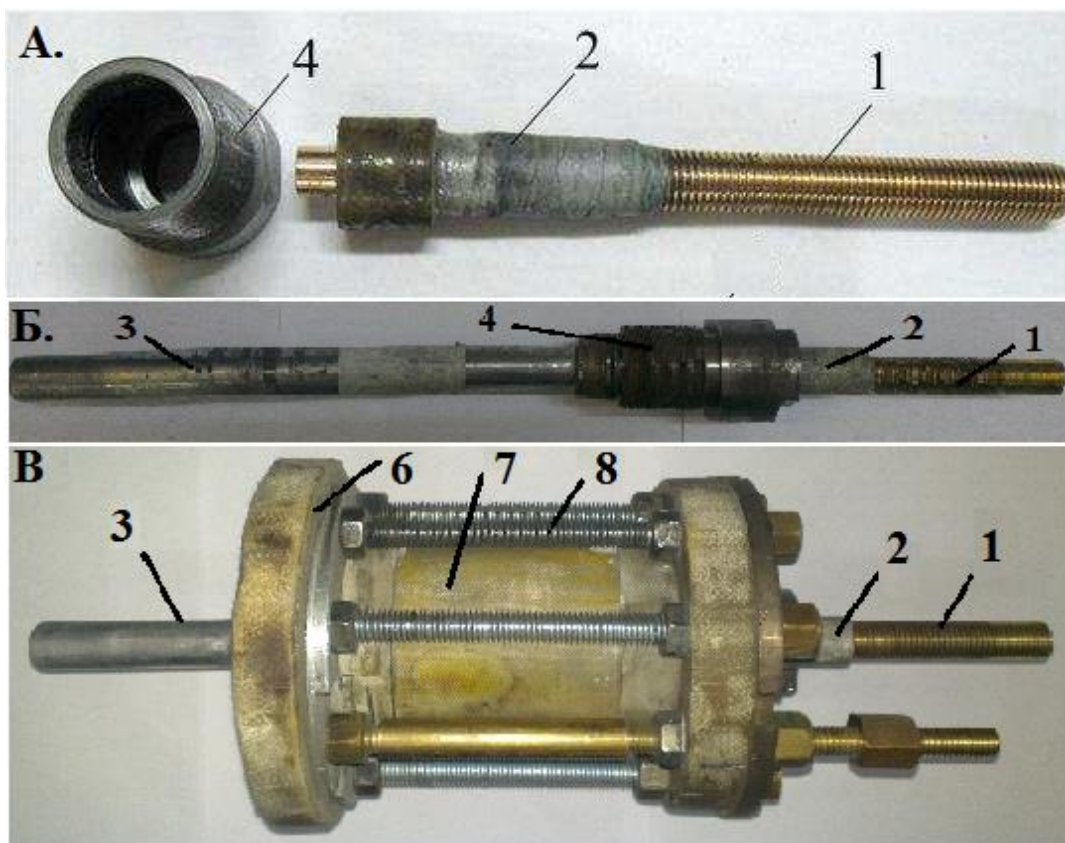


Рисунок 11 – КМПУ в сборе и его элементы

1 – латунный хвостовик ЦЭ; 2 – изоляция ЦЭ; 3 – электрод-ствол; 4 – втулка; 6 – контактный фланец; 7 – корпус индуктора; 8 – шпилька. А) - Отдельные узлы Z-пинч ускорителя, Б) пинч-ускоритель в собранном виде; В) КМПУ в сборе.

КМПУ закрепляется на крышке камеры-реактора, которая герметизируется и обеспечивает проведение плазменных выстрелов в газообразной атмосфере при давлении от 0,1 до 5 атм. Выводы электродов КМПУ присоединяются медными шинами к сборному коллектору силового контура ЕНЭ. ЕНЭ заряжается до требуемой величины напряжения $U_{зар}$. Типичные осциллограммы разрядного тока электропитания ускорителя $i(t)$ и напряжения на электродах $u(t)$ представлены на рисунке 12. При замыкании ключа К (управляемые разрядники) в момент времени $t_0=0$ по обозначенному стрелками контуру (рисунок 10) начинает протекать ток разряда конденсаторной батареи на индуктивную нагрузку.

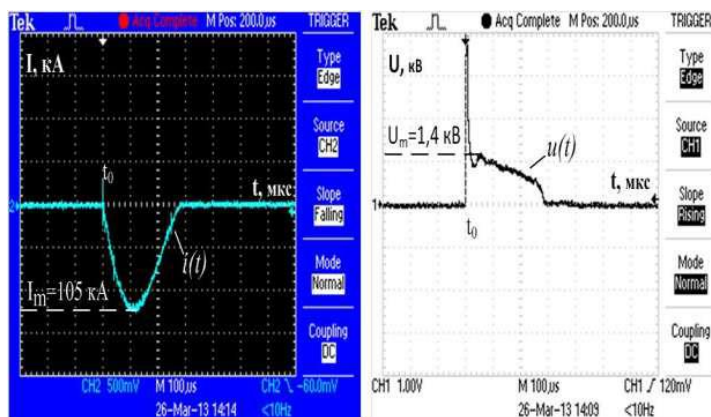


Рисунок 12 – Типичные осциллограммы тока разряда $i(t)$ и напряжения на электродах $u(t)$ при $U_{зар}=3,0$ кВ и $C=28,8$ мФ. (вставить свои осциллограммы)

Изучение динамических характеристик плазменных струй в свободном пространстве производилось с помощью высокоскоростной фоторегистрации процесса на установке ВФУ-1 и Photron Fastcam.

Газ (кислород) является элементом синтеза в процессе плазмодинамического синтеза оксида алюминия. Со свободной поверхности внутри трубки из алюминия, сверхзвуковой плазменной струи происходит высокоскоростное распыление жидкой фазы синтезированного Al_2O_3 и формирование

кристаллических ультрадисперсных частиц. Размер кристаллитов определяется условиями охлаждения и закалки материала, а именно начальной температурой, плотностью среды и скоростью плазменной струи в свободном пространстве. Естественно, в импульсной системе эти параметры изменяются в очень широком диапазоне, т.е. снижаются на хвостовой части импульса мощности, что и является основной причиной получения ультрадисперсных порошков с достаточно широким распределением частиц по размерам, от нанометров до микрометров.

Плазмодинамический синтез УДП оксида алюминия был осуществлен выстрел в свободной кислород содержащей. На рисунке 13. представлена фотография установки для реализации плазмодинамического синтеза.



Рисунок 13 – Установка для реализации схемы истечения плазмы

Суть метода следующая, при подведении к центральному электроду и электроду-стволу разности потенциалов от емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) алюминий переходит в плазменное состояние. Плазменный поток ускоряется и движется со скоростью, сравнимой со скоростью звука, в камеру-реактор, где происходит реакция синтеза, в качестве атмосферы

заполняют кислород, аргон, далее происходит формирование экстремальных энергетических условий (давления и температуры), способствующих прохождению химической реакции соединения алюминия и кислорода и получения ультрадисперсного порошка оксида алюминия Al_2O_3 . При этом в экспериментах можно изменять атмосферу (среду) проведения реакции, например, разбавлять инертным газом-аргоном при этом меняя содержание кислорода в камере-реакторе. Таким образом, управление фазовым составом синтезируемого порошка можно осуществлять за счет изменения среды проведения эксперимента.

2.3. Консолидация порошков оксида алюминия методом искрового плазменного спекания

В данном разделе представлены образцы полученные методом искрового плазменного спекания. В методе использовалась установка по спеканию порошковых материалов (рисунок 14) SPS 10-4 Thermal Technology (США). Технические характеристики приведены в таблице 5.



Рисунок 14 – Установка искрового плазменного спекания

Таблица 3 – Технические характеристики установки SPS 10-4 Thermal Technology

Технические характеристики системы		Значение
Температурный интервал	термопара	от 25 °С до 1000 °С
	пирометр	от 600 °С до 2400 °С
Скорость нагрева		0,1 до 1000 °С/мин
Скорость охлаждения		0,1 до 300 °С/мин
Атмосфера		инертный газ / вакуум
Общее усилие прессования		10 т

Атмосфера спекания для интервала температур	Аргон, азот	от 25 °С до 1800 °С
	Гелий 5.0	> 2000 °С
	Вакуум < 10 ⁻³ мбар	от 25 °С до 1800 °С
Потребляемый ток		От 0 до 4000 А

Метод искрового плазменного спекания (SPS) основан на явлении электрического искрового разряда, когда импульс тока высокой энергии мгновенно порождает искровую плазму при высоких локальных температурах (до 10 000 °С) между частицами. Искровая энергия испаряет загрязняющие вещества и оксиды на поверхности частиц до образования связи. Джоулево тепло концентрируется на поверхности частиц, вызывая пластическую деформацию, которая способствует достижения высокой плотности. Искровое плазменное спекание проводится под давлением до 10 тонн в вакууме с возможностью использования инертного газа. Контролирование температуры осуществляется при помощи термопары и пирометра.

Установка SPS 10-4 Thermal Technology имеет модульную конструкцию и состоит из следующих основных блоков (рисунок 15):

- Основной блок (камера спекания + пресс);
- Блок питания и управления;
- Гидравлическая станция и вакуумный насос.

Также установка искрового плазменного спекания имеет дополнительные вспомогательные устройства: водная система охлаждения, которая в свою очередь охлаждает пуансоны в камере и гидравлический пресс.



Рисунок 15 – Основные блоки системы SPS прессования

На блоке питания и управления (рисунок 15. по центру) в верхней части расположены: вакуумметр, низко- и высокотемпературный контроллер, кнопки вкл/откл и гидравлики, а также панель управления за газом и вакуумом и панель управления аварийной сигнализации. Снизу блока расположены силовые блоки по 10 кА, 10 В

На основном блоке (рисунок 15. слева) расположены: камера спекания, расходомер инертного газа подаваемого к окошку предназначенного для очищения от окалины, которые попадают при спекании, механический датчик давления и панель управления гидроцилиндром. Гидроцилиндр находится сверху камеры и может создавать силу от 3 – 100 кН. А также справа на этом блоке расположен пирометр. Пирометр начинает «видеть» температуру с 500 °С. Принцип действия пирометра основан на измерении мощности теплового излучения объекта, измеряет в диапазонах инфракрасного излучения и видимого света.

Гидравлическая станция (рисунок 15. справа) необходима для создания давления на пуансоны, которые в свою очередь давят на спекаемое изделие камере спекания.

Программирование измерения и управление установки производится компьютерной системой, которая задается вручную и позволяет программировать:

- программировать давление;
- задавать величину напряжения;
- задавать величину тока;
- задавать величину форму импульса;
- задавать частоту следования импульсов (длительность и промежутки);
- проводить регистрацию данных процесса.

Процесс подготовки к спеканию. Перед тем как порошок засыпают в графитовую пресс-форму, предварительно в пресс-форму и на «пятачки» пуансонов вырезается графитовая бумага. У графитовой бумаги две основных функции: первая – защита образца от пресс-форм, так как спекаемый образец взаимодействует с матрицей и частички графита попадают в образец, и вторая – защита пресс-форм от выработки (сохраняется срок службы пресс-форм). Далее пресс-форму обволакивают в графитовый войлок для снижения теплоотдачи в среду спекания (распределение равномерной температуры по образцу) и подготовленный для спекания порошок устанавливают в камеру спекания, затем прикладывают заданное давление к прессующим пуансонам и образец нагревают до заранее заданной температуры в рабочей камере или вакууме в среде инертного газа.

Температура образца измеряется пирометром через отверстие в пресс-форме, которое не достает до образца 2 мм. На рисунке 16 показаны основные элементы для спекания: графитовая пресс-форма, пуансон, графитовая бумага и графитовый войлок.

Температура в камере повышается с определенной скоростью до конечного значения, которое мы задаем в процесс программы спекания. Весь процесс контролируется по датчикам силы тока (А), напряжения на электродах (В), остаточного давления в рабочей камере (Па), перемещения прессующих пуансонов (мм), усилия прессования (кН), температуры ($^{\circ}\text{C}$).



Рисунок 16 – Основные элементы для спекания

Программа также записывает и сохраняет измеренные сигналы с датчиков управления процессом. На рисунке 17 представлена заданная программа для спекания оксида алюминия ($T = 1600^{\circ}\text{C}$, $P = 60 \text{ МПа}$).

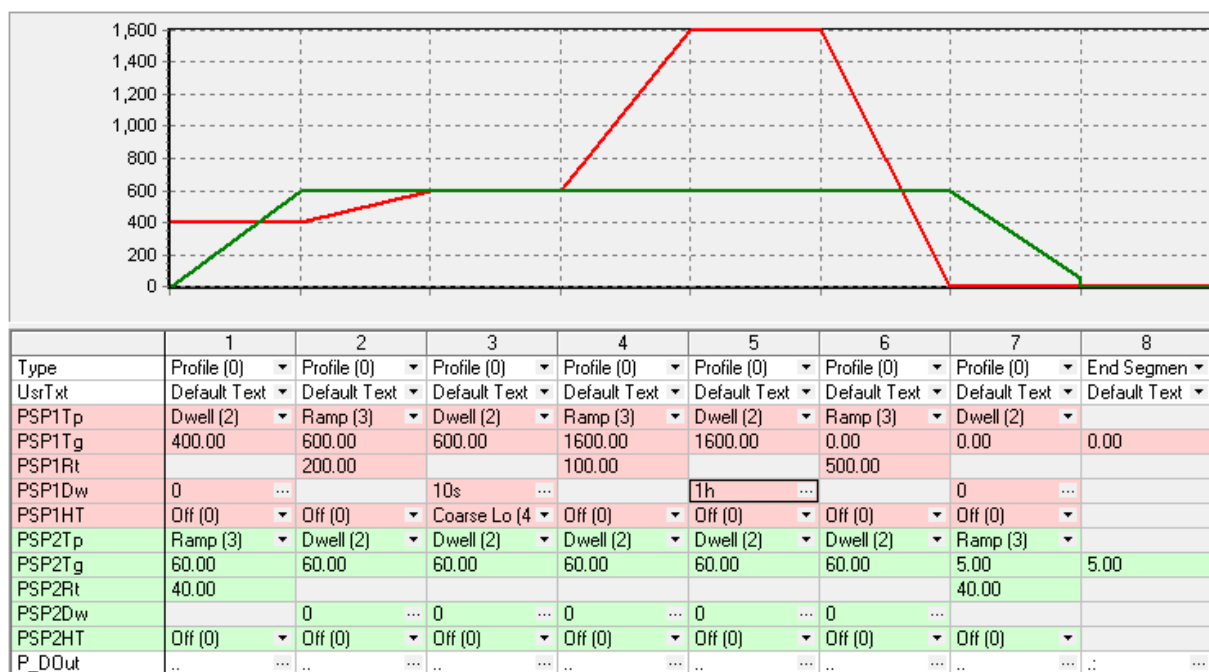


Рисунок 17. Программа спекания оксида алюминия

Из рисунка видно, что программа задается очень просто, что является большим преимуществом использования данной установки.

Далее в третьей главе будут рассмотрены результаты опытов и исследований. А также обработка и анализ полученных данных.

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Настоящая ВКР рассматривает научно-технические основы разработки получения прозрачной керамики на основе оксида алюминия от стадии получения ультрадисперсных порошков до стадии объемного материала который обладает прозрачными свойствами. Прозрачная керамика на основе оксида алюминия является материалом, обладающим высокой твердостью, относительно низкой плотностью, электроизоляционными свойствами и, конечно же, оптическими свойствами. Проблемы получения прозрачной керамики, исследования свойств и возможного применения оксида алюминия являются актуальными задачами в научном сообществе. Особое значение с ростом интереса к нанотехнологиям имеет проблема получения образцов керамики с высоким светопропусканием. Область применения которой следующая: применяется в оптических элементах диагностических систем термоядерного реактора.

Целью раздела является оценка инновационного потенциала научно-технического исследования (НТИ), планирование процесса НТИ, определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности.

4.1. Оценка инновационного потенциала НТИ

Для реализации производства прозрачной керамики на основе оксида алюминия, необходимо решить задачи, связанные с научными, техническими и экономическими проблемами. Основные задачи проекта указаны на рисунке 18. Две первые задачи, приведенные на рисунке, относятся к этапу научно-исследовательской работе (НИР) проекта, они связаны с получением опытного образца, основная роль отведена ученым-разработчикам. Следующие две задачи принадлежат к классу опытно-конструкторские работы (ОКР): участие ученых уменьшается и возрастает участие в проекте инженеров, призванных изготовить серийный образец продукции. Далее

проект нуждается в коммерциализации. Эту задачу необходимо решить привлеченному к участию предпринимателю и менеджеру.

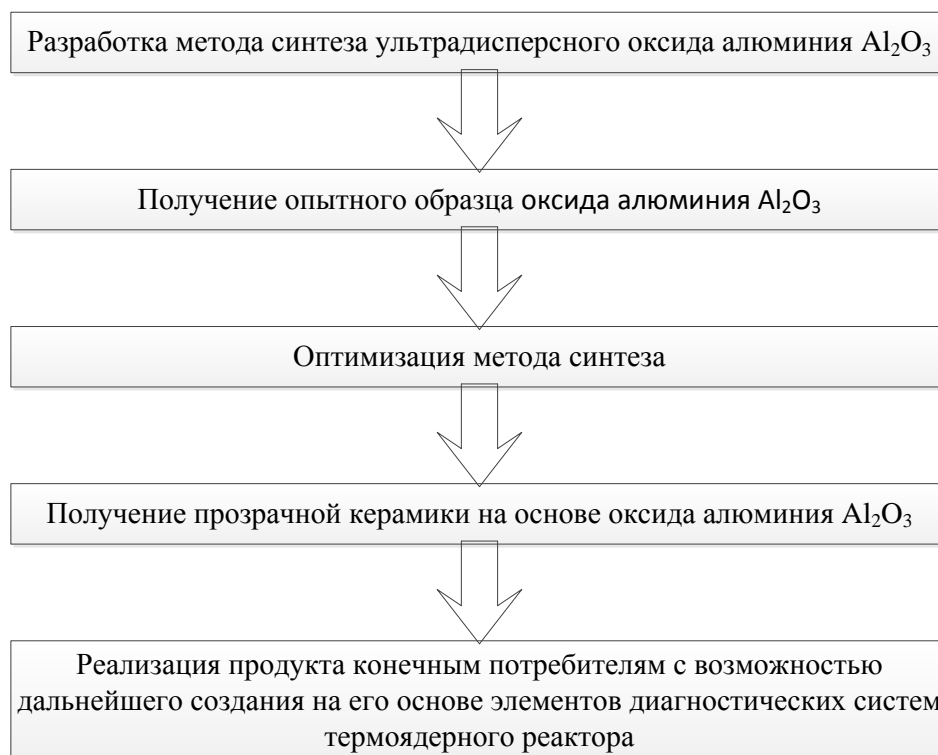


Рисунок 18 – Дерево целей

Задачи проекта решаются на базе оборудования, находящегося в 8 корпусе ТПУ. Главным объектом развития и оптимизации технологии является экспериментальная установка – коаксиальный магнитоплазменный ускоритель. Это устройство предназначено для получения нанопорошков различных соединений. В настоящий момент для настоящего проекта завершена стадия НИР, получен опытный образец, необходимо начать этап ОКР.

Разработка НТИ производится группой квалифицированных работников, состоящей из двух человек – руководителя и студента.

4.2. Оценка потенциала научного исследования

В настоящее время наблюдается тенденция к увеличению показателей функциональности и работоспособности изделий электронной техники, что приводит к повышению требований относительно надежности применяемых в этой области керамических и металлокерамических изделий. Вместе с этим,

в условиях сложившейся рыночной экономики отечественным предприятиям-изготовителям технической керамики необходимо достигать повышения эффективности производства и конкурентоспособности предлагаемой ими продукции и услуг.

Новизной полученных результатов является то, что полученный принцип получения прозрачной керамики на основе оксида алюминия не был никем получен ранее, что представляет большой интерес и высокую актуальность работы. А также, немало важно и то, что полученные разработки по прозрачной керамики могут заинтересовать как зарубежные, так и отечественные компании.

В нашей стране изготовлением керамических и металлокерамических изделий на основе оксида алюминия преимущественно занимаются в ОАО «Поликор» (Кинешма), ОАО «НИИВТ им. С.А. Векшинского» (Москва), ОАО «Плутон» (Москва) и ХК ОАО «НЭВЗ-Союз» (Новосибирск).

К постоянным потребителям данной керамической продукции, стабильно выпускающим современные изделия электронной техники, можно отнести такие предприятия как ЗАО «СНИИП-СИСТЕМАТОМ» (Москва), ОАО «НПП «Пульсар» (Москва), ФГУП «ВНИИТФА» (Москва), ХК ОАО «НЭВЗ-Союз» (Новосибирск), ОАО «Плутон» (Москва) и АО «НПП «Исток» им. Шокина» (Фрязино).

Поскольку, существуют определенные сложности в создании прозрачной керамики на основе оксида алюминия, то, есть необходимость в исследовании усовершенствования и развития технологии производства.

4.3. Планирование и организация научно-исследовательских работ

Планирование проекта – это составление календарных планов выполнения комплексов работ, определение денежных средств, необходимых для их реализации, а так же трудовых и материальных ресурсов [1].

Основные задачи:

1. Взаимная увязка работ проекта;

2. Согласование выполнения отдельных этапов работ во времени, определение их длительности и обеспечение их выполнения в установленные сроки;
3. Определение общего объема работ и потребных для его выполнения денежных, материальных и трудовых ресурсов;
4. Распределение общего объема работ между исполнителями.

В данном подразделе будет использован графический метод планирования научно-технического исследования, а именно график Ганта.

При графическом методе планирования на основе расчета трудоемкости и календарной продолжительности выполнения всех включенных в план работ с учетом их взаимосвязи и последовательности выполнения во временном масштабе (соответствующим производственному календарю планируемого года) строится графическая модель комплекса работ в виде линейной диаграммы, в которой положение и длина каждой линии характеризует дату начала (окончания) и продолжительность выполнения каждой работы. На основе линейного графика определяется общая продолжительность всего комплекса работ.

4.3.1. Структура работ научного исследования

Для определения трудоемкости выполнения проекта составим перечень основных видов и этапов работы, которые должны быть выполнены согласно [1] представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Перечень этапов, работ, продолжительность и распределение исполнителей

№ этапа	Наименование этапов	Наименование работ	Исполнители	Продолжительность этапов в %
1	Подготовительный этап	Разработка технического задания	Руководитель	10
		Разработка технического предложения	Студент	
2	Разработка	Исследование методов	Руководитель	30

	теоретической части темы	получения УДП порошков на основе оксида алюминия	Студент	
		Методы спекания УДП для получения прозрачной керамики на основе оксида алюминия		
3	Экспериментальные исследования	Разработка метода синтеза УДП оксида алюминия	Руководитель Студент	45
		Получение опытного образца методом спекания		
		Оптимизация метода синтеза		
		Получение прозрачной керамики на основе оксида алюминия		
4	Выводы по НТИ	Анализ полученных результатов и оформление пояснительной записки	Руководитель Студент	15
Итого				100

* УДП – ультрадисперсный порошок

4.3.2. Определение трудоемкости выполнения работ и построение графика Ганта

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения продолжительности $t_{ож}$ используется следующая формула [2]:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5},$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, чел.-дн.;

$t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости выполнения работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_{pi} [3]:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i},$$

где: $Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.;

В нашем случае $Ч_i$ будет равна 1, т.к. работа не может выполняться одновременно, работа выполняется последовательно.

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

Далее длительность каждого из этапов работ переведем в календарные дни [2]:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал},$$

где: T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях; T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях; $k_{кал}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{365}{365 - 114} = 1,45,$$

где: $T_{кал}$ – количество календарных дней в году; $T_{вых}$ – количество выходных дней в году; $T_{пр}$ – количество праздничных дней в году.

Результаты расчета трудоемкости и продолжительности каждой работы с указанием исполнителей всех этапов подготовки исследования приведены в таблице 7, названия этапов НТИ представлены в табл.22.

Таблица 7 – Определение трудоемкости работ

№ этапа	Кол-во исполнителей	Кол-во дней	Продолжительность работ			T_{pi} , раб.дн.	T_{ki} , кал.дн.
			t_{mini}	t_{maxi}	$t_{ожи}$		
1	Руководитель	18	17	19	18	18	26
	Студент						
2	Руководитель	51	49	54	51	51	74
	Студент						
3	Руководитель	77	74	80	77	77	110
	Студент						
4	Руководитель	26	25	27	26	26	37
	Студент						

Для более удобного и наглядного представления графика проведения научных работ, представим их в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

При построении был учтен тот факт, что работа по выполнению диссертации началась с 1 сентября 2016г.

График строится для максимального по длительности выполнения работ в рамках научно-технического проекта на основе таблицы 7 с разбивкой по месяцам.

Диаграмма Ганта представлена в таблице 8.

Таблица 8 – График Ганта

№ этапа	Исполнители	T_{ki} , кал.д н.	Продолжительность выполнения работ																																																				
			Сентябрь, 2016 г.																																																				
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31																						
Этап №1	Рук-ль	13																																																					
	Студент	13																																																					
Этап №2	Рук-ль	74																																																					
	Студент	74																																																					
Октябрь, 2016 г.																																																							
Этап №2	Рук-ль	74																																																					
	Студент	74																																																					
Ноябрь, 2016 г.																																																							
Этап №2	Рук-ль	74																																																					
	Студент	74																																																					
Декабрь, 2016																																																							
Этап №2	Рук-ль	74																																																					
	Студент	74																																																					
Этап №3	Рук-ль	112																																																					
	Студент	112																																																					
Февраль, 2017																																																							
Этап №2	Рук-ль	112																																																					
	Студент	112																																																					

Март, 2017																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
Этап №3	Рук-ль	112																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	Студент	112																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Апрель, 2017																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
Этап №3	Рук-ль	112																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		

4.4. Смета затрат на осуществление проекта

Смета затрат включает в себя:

- Расчет материальных затрат;
- Расходы на оплату труда;
- Отчисления во внебюджетные фонды;
- Накладные расходы.

В материальные затраты включаются дополнительно затраты на канцелярские принадлежности, диски, картриджи и т.д.

Составим таблицу по материальным затратам на осуществление проекта.

Таблица 9 – Сырье и материалы

Материалы и оборудование	Ед. изм.	Срок службы, год	Кол-во материала, ед.	Цена за ед., руб.	Затраты, руб.
Компьютер	шт.	7	1	35500	36000
Принтер лазерный цветной	шт.	5	1	7800	7000
Бумага формата А4	лист	-	1000	0,5	500
Пуансоны	шт	-	10	500	5000
Болты и гайки	шт	-	50	40	2000
колбы	шт	-	100	10	1000
Всего:					51500
Прочие расходы (10%)					5150
Итого:					56650

*прочие расходы – непредвиденные и транспортные расходы.

Величина расходов определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы тарифных ставок.

Заработная плата руководителя 300р/час, заработная плата магистранта 0р/час, в качестве поощрения студенту выплачивается академическая стипендия в размере 2000 р/мес.

Приведем пример расчета затрат заработной платы для руководителя проекта и магистранта:

Расчет произведем с учетом продолжительности и трудоемкости работ. Работы будут производиться в два этапа с учетом времени потраченного на сессию. С сентября по декабрь и с февраля по май

Этап 1.

С сентября по декабрь кол-во затраченного времени 18 недель, определим трудоемкость работ по выполнению ВКР:

1. По трудоемкости работ было затрачено времени в неделю: магистрант два дня в неделю по 4 часа, руководитель 2 дня в неделю по 1 часу.

2. За данный период рассчитаем количество затраченных часов на выполнение ВКР и определим материальные затраты.

$$З_{с-д} = (4 \text{ мес} * 2000 \text{ р/мес}) + (2 \text{ ч} * 18 \text{ н}) * 300 \text{ р/ч} = 18\,800 \text{ р},$$

где $З_{с-д}$ – Зарплата руководителю и магистранту за первый этап выполнения ВКР, период времени с сентября по декабрь.

Этап 2.

С февраля по май кол-во затраченного времени 16 недель, определим трудоемкость работ по выполнению ВКР:

1. По трудоемкости работ было затрачено времени в неделю: магистрант четыре дня в неделю по 5 ч, руководитель 4 дня в неделю по 1 ч.

2. За данный период рассчитаем количество затраченных часов на выполнение ВКР и определим материальные затраты.

$$З_{ф-м} = (4 \text{ мес} * 2000 \text{ р/мес}) + (4 \text{ ч} * 16 \text{ н}) * 300 \text{ р/ч} = 27\,200 \text{ р}$$

где $З_{ф-м}$ – зарплата руководителю и магистранту за второй этап выполнения ВКР, период времени с февраля по май.

Затраты на выполнение ВКР составят:

$$З_{\text{вкр}} = З_{с-д} + З_{ф-м} = 18\,800 \text{ р} + 27\,200 \text{ р} = 46\,000 \text{ р}$$

В таблице 10 приведена смета расходов на осуществление технического проекта.

Таблица 10 – Смета затрат на осуществление технического проекта

Затраты	Сумма, руб.	Структура затрат, %
Материальные расходы	56650	55,2
Расходы на оплату труда	46000	44,8
Итого:	102650	100,0

4.5. Оценка ресурсоэффективности НТИ

Определение ресурсоэффективности НТИ оценивается с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности [6]:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i \quad (33)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности; a_i – весовой коэффициент разработки; b_i – балльная оценка разработки, устанавливаем экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Для расчета интегрального показателя необходимо принять ряд критериев:

- надежность – обеспечение сохранения динамической устойчивости генераторов при различных возмущениях;
- безопасность – применение отключения генераторов в соответствии с нормативными документами;
- простота эксплуатации – разработка доступных и эффективных мероприятий для повышения динамической устойчивости генераторов;
- экономичность – применение разработанных мероприятий по повышению устойчивости генераторов с минимальными затратами денежных средств.

Далее необходимо оценить выбранные критерии по 5-и бальной шкале и определить интегральный показатель, с помощью которого и определяется эффективность использования НТИ.

Критерии оценивания НТИ для расчета интегрального показателя ресурсоэффективности приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Критерии оценивания НТИ

Критерии	Весовой коэффициент	Балльная оценка НТИ
1. Надежность	0,25	5
3. Безопасность	0,25	5
4. Простота эксплуатации	0,25	5
5. Экономичность	0,25	5
Итого:	1,00	

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности:

$$I_{pi} = 0,25 \cdot 5 + 0,25 \cdot 5 + 0,25 \cdot 5 + 0,25 \cdot 5 = 5$$

В результате расчета можно сделать вывод о том что, по 5-балльной шкале показатель ресурсоэффективности проекта составляет высокое значение, что говорит об эффективности НТИ.

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» было произведено:

1. Оценка инновационного потенциала НТИ;
2. Планирование и организация научно-исследовательских работ: был построен график Ганта: продолжительность работ составила 279 календарных дней в период с 1 сентября по 30 апреля;
3. Была составлена смета затрат, основной и дополнительной заработной платы, внебюджетных отчислений, а также накладных расходов. Основная часть бюджета ушла на основную заработную плату исполнителям. Общая стоимость НТИ составила 869,95 тыс. руб.;
4. Оценка ресурсоэффективности показала, что интегральный показатель ресурсоэффективности составил 5 единиц, что говорит о высокой эффективности проекта.

Таким образом, задачи, поставленные для осуществления цели раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение», выполнены. Показано, что проведенное исследование является эффективным с точки зрения ресурсоэффективности и ресурсосбережения.